Version 1.2

11 Framtagande av materialdata – teori och mätning

Copyright © 2015-2020 Byggföretagen och The Green Dragon Magic

Vad skall vi lära oss?

- Grundbegrepp och teori för mognadsgrad
  - Hållfasthetsutveckling och temperaturkänslighet
    - Tendenskurva vid 20°C
    - Hållfasthetstapp pga förhöjd härdningstemperatur
    - Hydratationshastighet
- Grundbegrepp och teori för hydratationsvärme
  - Hydratationsvärme och värmeutveckling
- Att genomföra mätningar av hållfasthetsutveckling
  - Temperaturkänslighet
  - Tips och trix
- Att genomföra mätningar av värmeutveckling
  - Tips och trix

Mognadsbegreppet

- Mognadsbegreppet för härdande betong utvecklades i England för att bedöma hållfasthetsutvecklingen vid förhöjda härdningstemperaturer.
- I Norden anammades mognadstekniken snabbt som en kraftfull metodik att bedöma skyddet mod *tidig frysning* samt hur snabbt *formen kunde rivas* under vintergjutningsmiljö eller vid kall väderlek.
- Genom årens lopp har det framkommit olika hjälpmedel för både planering av och uppföljning av betonggjutningar.

Tendenskurva vid 20°C

$$f_{cc}^{ref} = \begin{cases} f_A \cdot \left(\dfrac{t_e}{t_A}\right)^{n_A} & \text{för} \quad 0 \le t_e < t_A \\ f_{28d} \cdot \exp\left(s \cdot \left[1 - \sqrt{\dfrac{672 - t_S}{t_e - t_S}}\right]\right) & \text{för} \quad t_e \ge t_A \end{cases}$$

$$t_e = \beta_\Delta \int_0^t \beta_T \cdot \mathrm{d}t + \Delta t_e^0$$

$$\beta_T = \exp\left(\Theta\left[\frac{1}{293} - \frac{1}{T + 273}\right]\right)$$

$$\Theta = \Theta_{ref}\left(\frac{30}{T + 10}\right)^{\kappa_3}$$

f28d (MPa), *s* (-), *tS* (h), *tA* (h), *nA* (-) är anpassningsparametrar för referenshållfastheten;

fA (MPa) beräknas för *te* (h) = *tA* (h) med hjälp av andra uttrycket i ekv.

θ_{ref}, κ_3 är anpassningsparametrar för mognadsutveckling vid olika temperaturer.

β_T är temperaturfaktor (mognadsfunktion)

$\beta_0, \Delta t_0$ är parametrar som beskriver inverkan av t.ex. tillsatsmedel på mognadsförloppet.

Hållfasthetstapp pga förhöjd härdningstemperatur

- Hållfasthetstappet startar vid någon minsta temperatur, funktionen γ_{Temp} .
- Höga temperaturer påverkar hållfasthetstappet först efter viss tid, funktionen γ_{time} .
- Hållfasthetstappet beror på hydratationshastigheten (d*a*/d*te*) vilket motsvara bildad mängd hydratationsprodukter per tidsenhet, vilket är rimligt ur ett materialtekniskt synsätt.

Hållfasthetstapp pga förhöjd härdningstemperatur

- Den reducerade hållfastheten orsakad av förhöjd temperatur beskrivs av:

$$f_{cc} = f_{cc}^{ref} - \gamma_{drop} \cdot \Delta_{drop,28d}^{\max} \cdot f_{28d} \qquad \text{för alla } t_e \geq 0$$

där

$\Delta_{drop,28d}^{\max}$ (-) = maximalt hållfasthetstapp vid t_e = 28d, vilket motsvarar mycket höga härdningstemperaturer, i relation till f_{28d}, en parameter som bestäms vid anpassning mot försök.

γ_{drop} {0,1} = faktor som tar hänsyn till temperaturnivån under härdningen.

Hydratationshastighet

- Vid jämförelse med praktiska mätningar av den utvecklade reaktionsvärmen erhålls sällan mer än ca 80 - 85% i slutlig hydratationsgrad (reaktionsgrad) för en betong.
- Beräknade hydratationshastigheten sker genom tidsderivering av hydratationsgraden formulerad enligt :

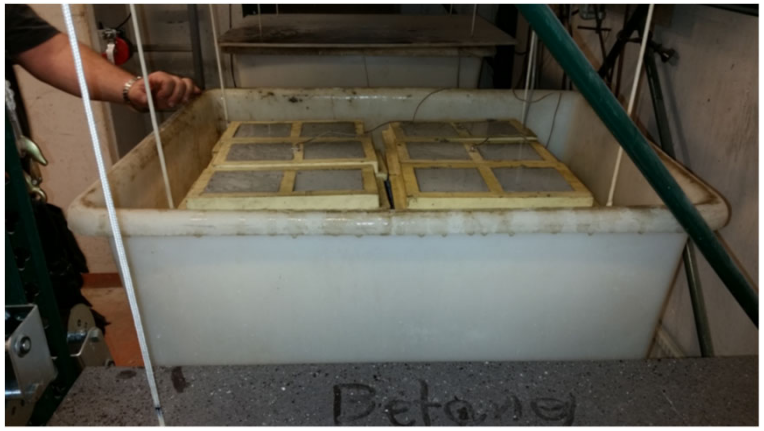
$$\alpha^* = \exp\left(-\lambda\left[\ln\left(1+\frac{t_e}{t_1}\right)\right]^{-\kappa_1}\right)$$

α^*	är reaktionsgrad (-),
λ_1, t_1, κ_1	är anpassningsparametrar mot kalorimeterförsök (-), (h), (-),
t_e	är ekvivalent tid (h)

Hållfasthetsutveckling

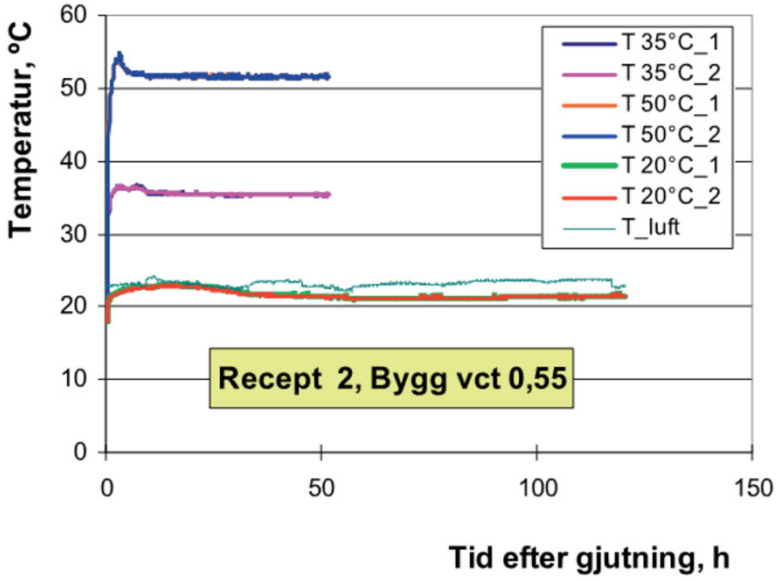
- Hållfasthetsutvecklingen i betongen påverkas av härdningstemperaturen, eftersom graden av kemiska reaktioner är kopplad till temperaturen
- För att undersöka hållfasthetstillväxtens beroende av temperaturen lagras provkroppar i minst tre tempererade vattenbad.
- Provning av hållfasthetsutvecklingen sker vid olika tidpunkter för de olika temperaturnivåerna.
- Samtliga provkroppar är tillverkade i samma blandningsomgång för att inte få in onödiga blandningsvariationer i mätresultaten

Tillverkning av provkroppar



- Blanda betongmassan
- Kontrollera att receptets specifikationer är korrekt med förutsättningarna
- Gjut provkropparna. Rekommenderas minst tre per provningtillfälle.
- Montera temperaturgivare (termotråd) i provkropparna för att kunna registrera temperaturen i betongen.
- Vänta 15 -30 minuter innan provkropparna placeras i vattenbaden.

Lagring av provkroppar

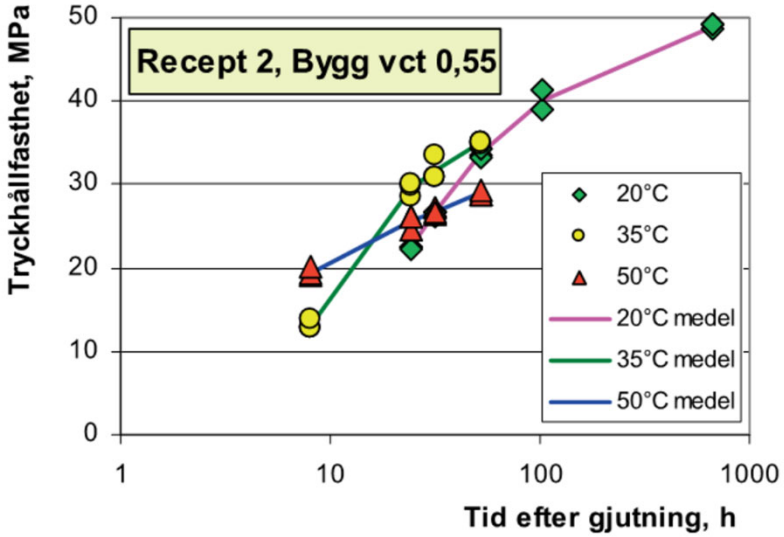


b) Registrerade betongtemperaturer

- Efter gjutning placeras provkropparna i tempererade vattenbad
- Minst tre olika lagringstemperaturer: **referenstemperatur** (~20°C) samt två andra temperaturer (~35°C och ~50°C)
- Temperaturen registreras (loggas) i betongen.
- Om möjligt kan provningen kompletteras med lagring vid lägre temperatur än referenstemperaturen användas (~5°C).

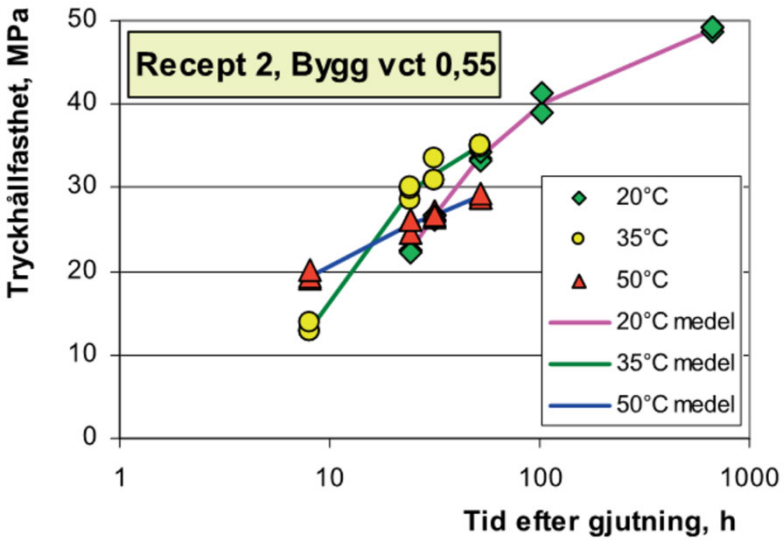
Provtryckning

- Hållfastheten bestäms vid olika tidpunkter:
  8h, 16h, 24h, 32h, 52h och 102 h efter blandningen
- Resultaten protokollförs



a) Mätta tryckhållfastheter

Provtryckning



a) Mätta tryckhållfastheter

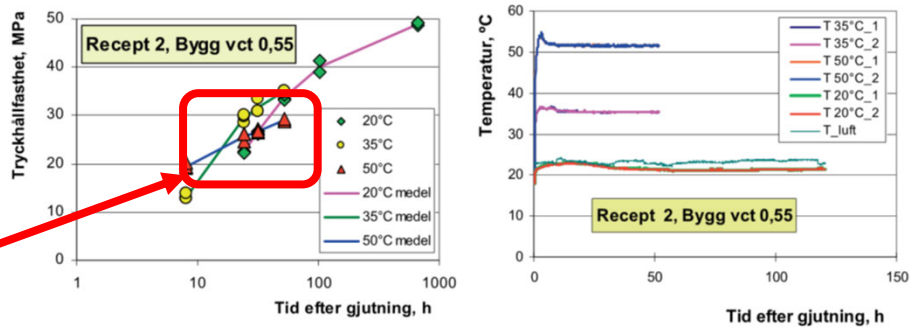
- Efter gjutning placeras provkropparna i tempererade vattenbad
- Minst tre olika lagringstemperaturer skall användas (20°C, 35°C och 50°C)

Tips och trix

- För att undersöka ett cements temperaturkänslighet måste provning ske vid högre härdnings-temperaturer jmf med referenstemperaturen.

Temperaturkänsligt cement

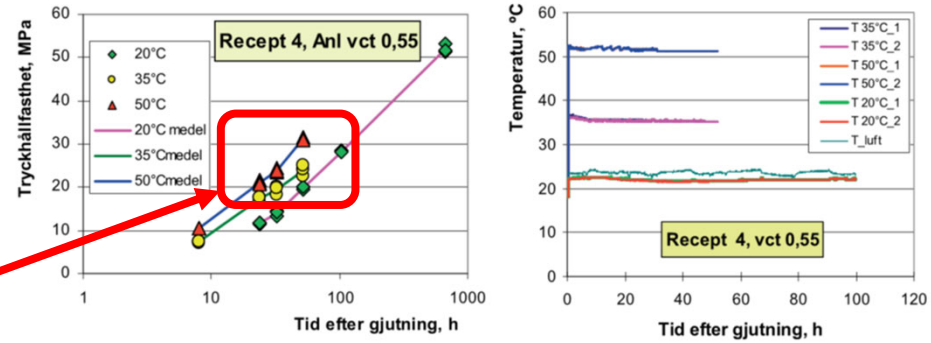
Tappar i hållfasthet vid höga härdningstemperaturer



a) Mätta tryckhållfastheter b) Registrerade betongtemperaturer

Ej temperaturkänsligt cement

Tappar inte i hållfasthet vid höga härdningstemperaturer



a) Mätta tryckhållfastheter b) Registrerade betongtemperaturer

Hydratationsvärme

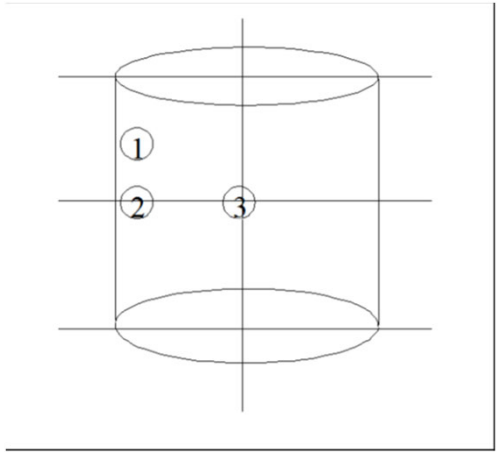
- Värmeutveckling i betongen bestäms med hjälp av en semi-adiabat. En semi-adiabatprovning är en kalorimetrisk metod för att bestämma värmeutveckling.
- Laboratorieprovningen utförs genom att isolera betongprovet med cellplast och registrera temperaturen i betongprovet.
- Hydrationsvärmet för det undersökta betongprovet beräknas utifrån de insamlade temperaturmätningarna från semi-adiabatprovningen. Metoden bygger på kontinuerlig mätning av temperaturen i den hydratiserande betongen.
- Värmeförlusten till omgivande luft beskrivs med ett framtestat avkylningstal, och denna ”förlustvärme” adderas till den direkt uppmätta värmen i betongen.

Värmeutveckling

$$Q = W_u \cdot \alpha \cdot C$$

- *Q* = utvecklad värme i betongen (J/m3);
- *Wu* = utvecklad värme efter ”oändlig” tid per cementmängd (J/kg);
- *C* = cementhalt (kg/m3);
- α = hydratationsgrad

Tillverkning av provkroppar

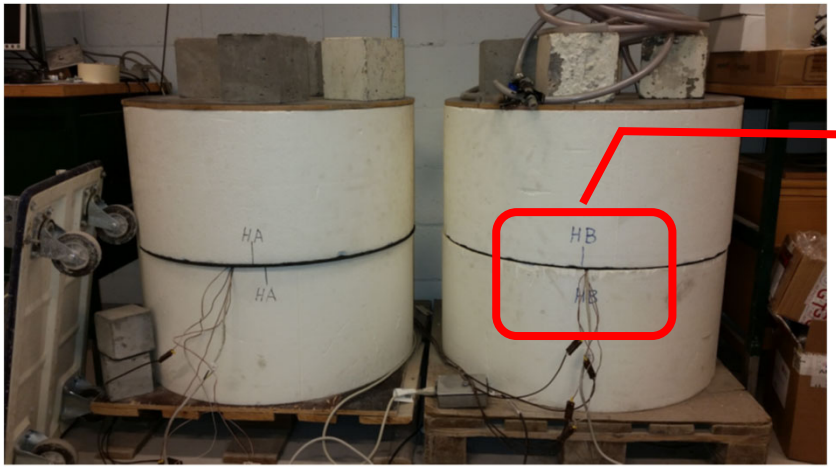


- Vid gjutning av provkroppar för kalorimetriska försök används tunna formar med sådan tjocklek att ingen värmelagring kan ske i formmaterialet.
- Bra förutsättningar ges av t.ex. målarburkar (ca 4 liter) av plåt. I kärlen monteras termotråd enligt figur th för temperaturregistrering.

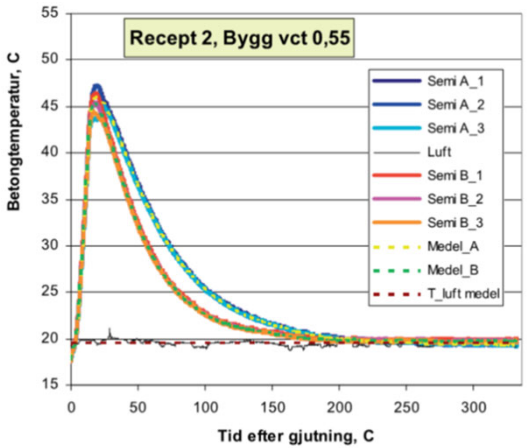
Semi-adiabatprovning

- Vid semi-adiabatisk provning krävs ingen reglering, däremot krävs för utvärderingen att värmeförlusterna från utrustningen är kända.
- Värmeförluster representeras av ett avkylningstal vilket är olika för olika utrustningar. Avkylningstalet ger en beskrivning av de isoleringsförhållanden som rådde under försöket.
- Efter gjutning vägs provkropparna och ytan täcks med ca 1 cm vatten för att tillgodose uttorkningen (p.g.a. hydratationen) av betongens yta. Därefter försluts kärlen (formarna) och placeras i kalorimeterutrustningen. Kalorimeterutrustningen bör bestå av två semi-adiabatiska, utan temperatur reglering.
- Den semi-adiabatiska utrustningen består av cellplastblock i vilket provkropparna placeras och får hydratisera fritt utan någon styrning.

Provutrustning



Termotråd



a) Betongtemperaturer under härdning

Temperaturlogger

Avkylningstal

- Resultatet från en semi-adiabatisk provning kan räknas om till att motsvara adiabatiska förhållanden när behållarens avkylningstal är känt. Avkylningstalet, *a* (s^{-1}) el. (h^{-1}) definieras enligt:

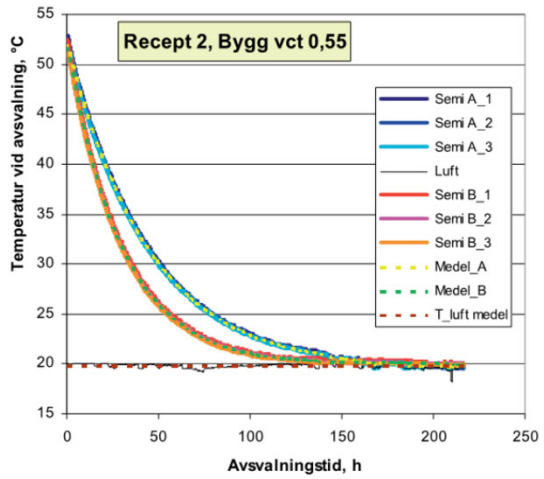
$$\frac{dT}{dt} = a(T - T_e)$$

där: T är provets temperatur (°C),

t är tiden (h el. s),

T_e är omgivningstemperaturen (°C).

- Kontroll av den semi-adiabatiska provutrustningens avkylningstal bestäms genom att värma upp den gammal provkropp, där ingen värmeutveckling sker, och registrera temperaturen under dess avsvalning. På detta sätt används alltid ett korrekt avkylningstal vid utvärderingen.



b) Icke-härdande avsvalningsförlopp

Tips och trix

- Om provkropparna som används vid bestämning av avkylningstalen för semi-adiabaterna inte är fullständigt hydratiserad kommer kvarvarande reaktionsvärmen att störa utvärderingen.
- Vid utformning av en semi-adiabatisk provutrustning är det viktigt att uppnå en optimal grad av isolering. Med för mycket isolering uppstår mätfel då värmet av betongen går åt till att värma upp isoleringen. För lite isolering medför att avsvalningen går för snabbt och att differensen ($T - Te$) blir liten.
- Efter att den naturliga temperaturutvecklingen, styrd av betongens hydratationsvärme och isoleringsgraden, avklingat, värms betongen upp artificiellt med hjälp av en värmematta
- Rekommenderat är att vänta minst två veckor efter gjutning för att kvarvarande reaktionsvärme skall vara försumbart liten.
- Vid jämförelse med praktiska mätningar av den utvecklade reaktionsvärmen erhålls sällan mer än ca 80 - 85% i slutlig hydratationsgrad för en betong som används vid anläggningsgjutningar

Vad har vi lärt oss?

- Grundbegrepp och teori för mognadsgrad
- Grundbegrepp och teori för hydratationsvärme
- Att genomföra mätningar av hållfasthetsutveckling
- Att genomföra mätningar av värmeutveckling

Att utvärdera mätningar av hållfasthets- och värmeutveckling kommer i nästa avsnitt.